

САЕ – ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Ахмедзянов А.М., Кожин Д.Г.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Методология термогазодинамического анализа авиационных двигателей вступила в этап активного использования САЕ-технологий. Концептуальные системы САЕ-технологии предназначены для функциональной оценки двигателей и их узлов, охватывая широкий круг задач моделирования термогазодинамического состояния рабочего тела в различных узлах двигателя.

Программные продукты САЕ-технологий по уровню задач разделяют на три уровня:

- универсальные - как NASTRAN и ANSYS;
- специализированные для определенного круга задач, такие как Fluid;
- специализированные для определенного класса технических объектов, например двигателей, такие как GASTURB (ФРГ), GECAT(США), TESS/JESS(США), САМСТО (Россия), ГРАД (Россия).

Функциональное моделирование двигателей и их элементов производят на различном уровне физического представления. Сложность (и стоимость) таких систем обычно прямо зависит от круга охватываемых задач моделирования, степени учета пространственных и временных координат, учета реальных, в том числе стохастических факторов (тепло-массообмен, в т.ч. модели турбулентности, вязкости и т.д.).

Чаще всего для моделирования на распределенном уровне (2-х и 3-х мерные стационарные и нестационарные модели) используют МКЭ –метод конечных элементов. На нем основаны универсальные системы (Nastran, Ansys, ИСПА) и специализированные (SIMTEC и MAGMasoft – моделирование литья металла, MoldFlow – моделирование литья пласт-масс, TaskFlow – моделирование газодинамики, Fenix – моделирование газодинамики с горением). Теоретическая основа построения таких моделей обычно – механика сплошной среды. Модель есть результат взаимодействия на трех уровнях: объекта в целом с внешней средой (внешними объектами), элементов объекта между собой и описание свойств отдельного элемента. Это описывается уравнением состояния среды в микрообъеме (“в малом”), законом сохранения и переноса массы, импульса или момента импульса, энергии и формулировки граничных условий взаимодействия с внешней средой (внешними объектами).

Обычно с учетом специфики постановки задачи математически это сводится к определенному виду уравнений в частных производных или (и) к интегральным уравнениям. Могут иметь место интегральные функционалы от допустимых распределений параметров. Количественный анализ континуальной системы в частных производных связан с использо-

ванием МКР – метода конечных разностей. При этом производится конечно-разностная аппроксимация производных от искомых распределений параметров и сведение исходной математической модели к дискретному аналогу из системы конечных уравнений относительно неизвестных значений параметров в узлах пространственно-временной сетки.

На этапах концептуального проектирования широкое распространение получил CAE-технологии решения задач третьего уровня. Среди них:

GASTURB 8.0 for Windows /разработка: университет г.Мюнхен, Германия/. Программа газодинамического расчета рабочих характеристик и нерасчетных режимов работы ГТД.

GECAT /разработка: университет Алабама, США, только для использования на территории США/. Инструмент для анализа цикла двигателя. Gecat – это программное аналитическое обеспечение, разработанное для проектирования и анализа цикла БРД. Оно состоит из одобренной NASA программы работы двигателя (NEPP) в графическом режиме. Gecat был разработан для армейской авиации США и командования ракетными войсками.

The Java Gas Turbine Simulator /разработка: университет Толедо, США/. Среда моделирования газотурбинных двигателей. Среда моделирования газотурбинных двигателей является программой – апплетом на языке Java, разработанной, для того чтобы помочь студентам лучше понимать сложную природу функционирования газотурбинных двигателей (ГТД), особенно реактивных авиадвигателей.

Для моделирования газодинамических процессов известна модификация метода МКР (пакет КРУЧА – крупных частиц). МКР имеет недостаток – если модель сложная, то грубая сетка дает ощутимую погрешность.

МКЭ – метод конечных элементов – свободен от этих недостатков. Здесь разбивают область, где протекает процесс, на конечные элементы, для которых есть классические (аналитические) решения, и задают внутри них непрерывные распределения параметров, выраженные через неизвестные узловые значения параметров и их пространственные производные. Типовые конечные элементы, допускающие деформации, позволяют достаточно точно представить геометрию области и получить достаточно точное решение. При этом, правда необходимо иметь математическую модель рассматриваемого процесса в интегральном виде. Именно поэтому, например, один и тот же Решатель систем Nastran или Ansys по-разному реализуется для задач механики твердого тела и для газовой динамики (создают специализированные пакеты типа CF/Design).

Для CAE – систем важен интерфейс с CAD-системами для передачи поверхностных или твердотельных геометрических моделей деталей или проточных каналов. Для этого они должны поддерживать стандарты на передачу геометрической информации – DXF, GKL, IGES и самый современный – STEP. Ряд фирм (например MSC) снабжают свои CAE-системы CAD-частью.

С другой стороны, производители CAD/CAM- систем вводят препроцессоры (построение сетки и задание граничных и начальных условий) для CAE-систем в свои продукты. Такие модули есть в Simatrop, Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer, Euclid. Упомянутые полномасштабные CAD/CAM/CAE – системы обычно содержат в себе CAE- системы для оперативного анализа НДС, теплового состояния деталей, гидравлики и газодинамики (в упрощенной постановке). Для полноценного CAE-анализа необходимо приобретать специализированные CAE- системы, хотя по цене они превосходят CAD/CAM-системы.

На протяжении многих лет разрабатывалась в Казанском авиационном институте и широко использовалась в промышленности система ГРАД [3] – “Система газодинамического расчета авиационных двигателей” предназначенная для выполнения проектных расчетов газотурбинных двигателей.

На кафедре авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия) традиционно много лет использовались и создавались программные средства для функционального параметрического моделирования авиационных двигателей и их узлов. В 1992 году было разработано компьютерное приложение под названием ПАРАД – “Параметрический анализ рабочего процесса авиационного двигателя”. Рассчитано оно было на популярную тогда в России операционную систему MS-DOS. Позже ПАРАД был развит в систему САМСТО [1] - “Система автоматизированного моделирования сложных технических объектов”. Приложение DVIG предназначалось для функционального моделирования в первую очередь авиационных двигателей. САМСТО - программа предназначалась для компиляции других программ - это инструмент разработчика функциональной CAE-технологии – задач третьего уровня.

Задача создания системы САМСТО обуславливалась необходимостью моделирования термогазодинамических процессов в авиационных двигателях, а точнее легко и просто создавать и модифицировать приложения, моделирующие термогазодинамические процессы в авиационных двигателях по различным в каждой конкретной фирме (КБ) алгоритмам. Создаваемые приложения в свою очередь должны были обладать значительной гибкостью при моделировании двигателей различных, в общем случае произвольных схем (типов) и при решении различных расчетных задач, таких как синтез, анализ, оптимизация и т.д. Благодаря такой обобщающей постановке задачи САМСТО оказалась системой, способной описывать различные предметные области - не только авиационные двигатели, но и любые технические объекты, модель которых можно представить в виде совокупности элементарных составляющих.

Таким образом, при создании среды САМСТО для моделирования авиационных двигателей была применена концепция парaprogramмирова-

ния. Парапрограммирование (буквально означает самопрограммирование) подразумевает создание прикладных программ “для себя” специалистами-непрограммистами. Потребность в таком подходе обусловлена рядом причин:

- практически каждому специалисту-предметнику нужны компьютерные приложения, моделирующие его предметную область - объект проектирования, функциональные задачи процесса проектирования и т.д.;
- создание для каждой задачи нового компьютерного приложения является слишком трудоемким делом, сопряженным с неоправданно большим расходом ресурсов;
- необходимость организации интеллектуального взаимодействия специалиста-предметника и программиста, первый из которых должен исчерпывающе сформулировать задачу, а второй реализовать ее, не зная предметной области;
- необходимость постоянного сопровождения и доработки созданного компьютерного приложения самими разработчиками;
- трудности, связанные с развитием системы пользователем.

Программный продукт САМСТО был разработан с учетом перечисленных требований.

С помощью САМСТО описываются типы узлов двигателя или компоненты какой-либо другой технической системы; а также типы информационных взаимосвязей для соединения компонентов моделируемой системы в единую модель. Затем генерируется автономное приложение (подсистема), с помощью которого создаются и исследуются модели технических объектов заданной предметной области, например, авиационные двигатели (подсистема DVIG). DVIG основан на компонентной технологии построения модели газотурбинного двигателя. В распоряжении пользователя имеется набор элементов, соответствующих узлам двигателя, из которых можно построить модель двигателя практически любой конструктивной схемы, включая гипотетические несуществующие схемы. Набор типовых элементов включает модели следующих узлов: входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, камера смешения, переходный канал, разделитель потоков, отбор воздуха (газа), подвод воздуха (газа), радиатор, реактивное сопло, форсажная камера, подвод тепла, отвод тепла, впрыск жидкости, воздушный винт, дифференциал, редуктор, коробка агрегатов и т.д.

С помощью САМСТО пользователь может добавлять в DVIG новые типовые элементы, редактировать существующие и удалять ненужные.

В приложении DVIG элемент модели имеет несколько уровней описания:

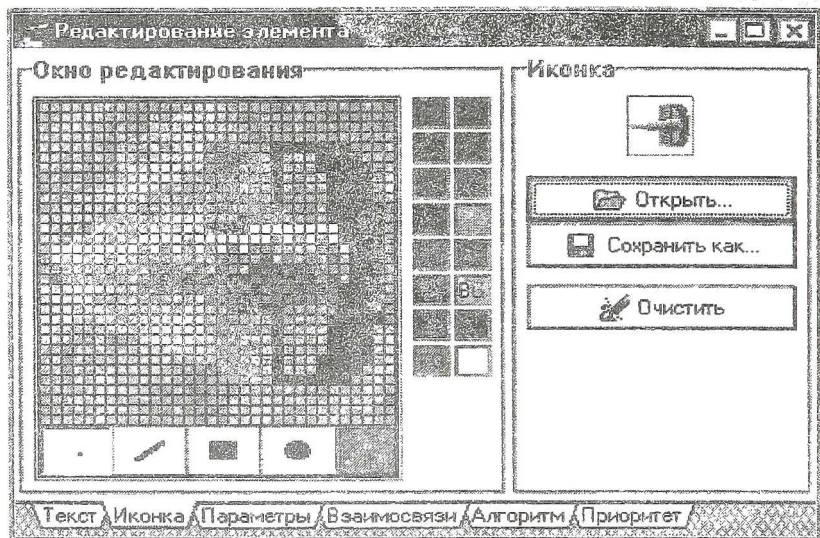


Рисунок 1 - Окно редактирования иконки элемента модели

- *Визуальный уровень:* пиктограмма. Пользователь для обозначения элемента может импортировать в DVIG любую пиктограмму в формате ICO Windows; может нарисовать новую пиктограмму или модифицировать существующую. Окно редактирования пиктограммы приведено на рис.1.
- *Топологический уровень:* номенклатура и типы входных и выходных параметров; номенклатура входных и выходных информационных взаимосвязей. Пользователь может описать элемент модели с тем набором параметров, который соответствует математической (алгоритмической) модели данного узла двигателя. Простые учебные модели содержат только несколько основных параметров; высокоадекватные промышленные модели могут содержать значительное количество параметров. Окна редактирования параметров приведены на рис. 2.
- *Текстовый уровень:* наименование типа элемента, пояснение (краткое описание сущности элемента). Пояснение носит характер справочной информации и может быть достаточно развернутым;
- *Алгоритмический уровень:* алгоритм расчета значений выходных данных и значений параметров выходных информационных взаимосвязей по значениям входных данных и значениям параметров входных информационных взаимосвязей. Для написания расчетных алгоритмов

используется алгоритмический язык Pascal. Выбор этого языка программирования обусловлен несколькими причинами.

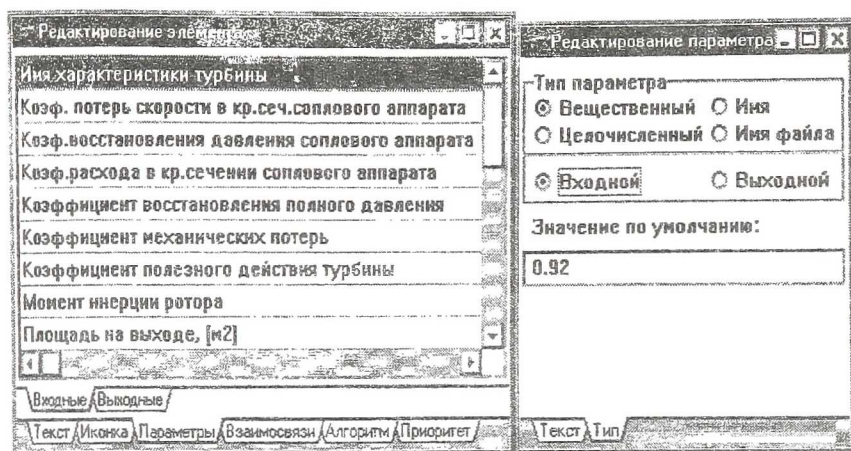


Рисунок 2 - Окна редактирования параметров

Во-первых, это должен быть хорошо известный распространенный язык, позволяющий избежать необходимости обучения персонала или студентов новому алгоритмическому языку. Во-вторых, этот язык должен обладать такими качествами, как гибкость и мощность, простота и близость к естественному языку (рис.3.).



Рисунок 3 - Соотношение качеств алгоритмических языков

Для соединения элементов в единую модель существуют унифицированные информационные взаимосвязи. Как и элементы, типовые взаимосвязи полностью описываются пользователем. Каждая типовая информационная взаимосвязь может содержать множество параметров одновременно. Например, для передачи от элемента к элементу параметров газодинамического потока существует газодинамическая взаимосвязь, содержащая все параметры газового потока.

В приложении DVIG пользователь-проектировщик может создавать различные математические модели двигателей, манипулируя типовыми элементами и типовыми информационными взаимосвязями. Модель создается путем расположения на рабочем поле DVIG необходимых элементов модели (можно иметь несколько экземпляров элементов одного типа) и соединения их типовыми информационными потоками через соответствующие соединительные звенья элементов. Пользователь-проектировщик делает это на визуальном уровне, на экране компьютера, при этом реальное информационное составление модели осуществляется автоматически. Пример модели двухвального двухконтурного двигателя приведен на рис.4.

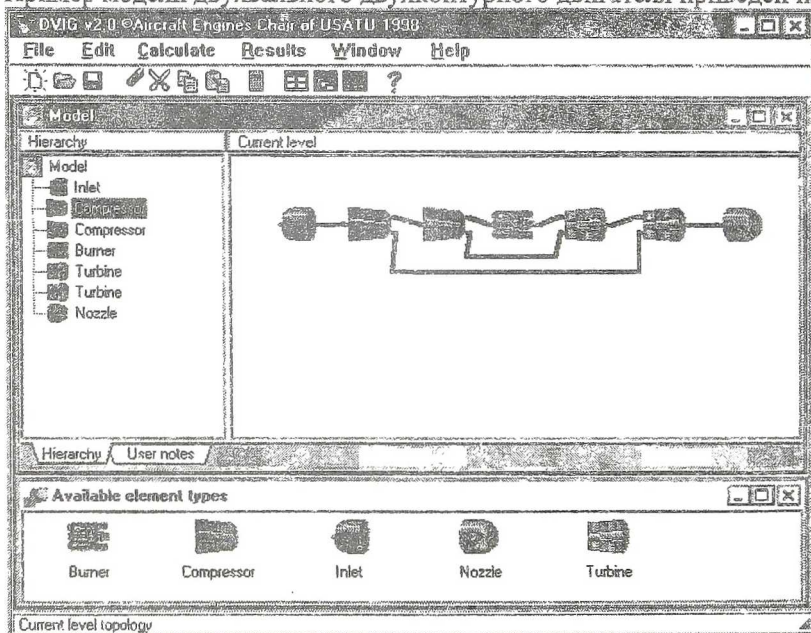


Рисунок 4 - Структурная модель двухконтурного ГТД с среде DVIG

Созданная таким образом математическая модель авиационного двигателя может быть исследована путем решения разнообразных расчетных задач, таких как моделирование поведения двигателя в различных условиях и режимах работы; оптимизация проектных параметров и т.п.

Расчетные задачи в контексте CAMCTO/DVIG представляют собой вложенные задачи CAE, такие как структурный синтез - создание топологии модели пользователем; параметрический анализ - определение параметров двигателя в различных условиях; параметрический синтез - определение значений входных параметров по заданным значениям вычисляемых параметров; параметрическая оптимизация - нахождение оптимальных значений входных параметров в соответствии с заданной функцией цели; и структурная оптимизация - нахождение оптимальной схемы двигателя в соответствии с заданной функцией цели (сейчас в стадии разработки).

Сравнительный анализ CAE-технологии в области термогазодинамического анализа авиационного двигателя показал, что отечественные прикладные подсистемы (ГРАД, ПАРАД, CAMCTO-DVIG) по всем признакам относятся к третьему уровню CAE-систем и успешно конкурируют по многим параметрам с зарубежными системами (GASTURB 8.0 for Windows, GECAT, The Java Gas Turbine Simulator), а в ряде случаев имеют существенные преимущества за счет возможности вложения в "свои" оболочки собственные идеи НОУ-ХАУ и богатейший опыт создания нескольких поколений газотурбинных двигателей.

Список литературы

1. Ахмедзянов А.М., Кожин Д.Г. Система конструирования среды для математического моделирования сложных технических систем // Изв. вузов. Авиационная техника. 1994. №1. С.54-58.
2. Ахмедзянов А.М., Ижикеев В.И., Матковская Н.А. Формирование математических моделей ГТД переменного рабочего цикла // Изв. вузов. Авиационная техника. 1990. №3. С.83-86.
3. Голланд А.Б., Мац Э.В., Морозов С.А., Тунаков А.П. и др. Программный комплекс ГРАД для расчета газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1985. №1. С.83-85.
4. Система CAMCTO - Разработка Уфимского государственного авиационного технического университета, - <http://www.ad.ugatu.rb.ru/camcto/index.htm>.
5. Система DVIG - Компьютерная среда для моделирования термогазодинамических процессов газотурбинных двигателей произвольных схем - Разработка Уфимского государственного авиационного технического университета, - <http://www.ad.ugatu.rb.ru/dvig/index.htm>
6. Система GECAT - Разработка: университета Алабама, США, - <http://www.srs.com/Products/Gesat/gesat.html>
7. Система GASTURB 7.0 for Windows - Разработка: университет г.Мюнхен, Германия, - E-mail: Joachim.Kurzke@t-online.de.
8. The Java Gas Turbine Simulator - Разработка: университет Толедо, США - Среда моделирования газотурбинных двигателей, - [http:// memslab.end.utoledo.edu/~jreed/jgts/JavaGasTurbineSimulator.html](http://memslab.end.utoledo.edu/~jreed/jgts/JavaGasTurbineSimulator.html).